

平歯車の仕上げ転造における歯形誤差の発生機構とその抑制に関する研究

著者	植松 整三
号	1237
発行年	1991
URL	http://hdl.handle.net/10097/10044

氏 名	うえ 植 まつ 松 せい 整 ぞう 三
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 3 年 11 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 35 年 3 月 山形大学文理学部物理学科卒業
学 位 論 文 題 目	平歯車の仕上げ転造における歯形誤差の発生機構と その抑制に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 江村 超 東北大学教授 庄子 克雄

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

歯車の仕上げ転造とは、歯切り加工した歯車に僅かな加工代を残して高精度の歯形およびピッチを有する工具歯車とかみあわせ、加圧しながら創成運動を行い、被加工歯車の歯形誤差、ピッチ誤差および歯面あらさの改善を目的とした加工法である。この概念は Ford 社から 1968 年に発表された。そのときの Ford 社の発表では、工具に特殊な歯形修整をしたものを用いて、DP19.3、歯数 19、ねじれ角 20° のはすば歯車を歯形精度 JIS 1 級程度に量産することに成功している。この方法によれば工具寿命が極めて長いことと、加工能率が高いことが特徴である。

Ford 社の発表に基づき仕上げ転造を諸元の異なる歯車に適用することが研究者や生産現場の技術者によって試みられたが歯形精度はかえって悪くなる場合があった。そのために実用化を目指して歯形誤差の発生機構の解明と抑制対策についての研究が進められた。しかし現実には原因は十分に解明されてはおらず、また、効果的、実用的な抑制対策も見出されていない。

本論文の目的は第一に仕上げ転造で問題となっている歯形誤差の発生機構を平歯車を対象にして解明する。第二に誤差の発生を抑制する転造法の開発をすることである。

本研究では初めに実験によって歯形誤差はくぼみと圧力角誤差から合成されていることを確認した。また、歯形誤差は実験条件によって多様に変化するので、歯形形状を客観的に評価する方法として転造効果の評価法について定義した。定義した評価法に基づき、歯車の転位係数、工具押込み力などの実験条件と歯形誤差の発生条件の関係を明確にして、歯形誤差の発生機構を解明した。

その結果、くぼみは工具を一定荷重で押込む時に生ずる同時かみあい点数の変化に基づく歯面接触力の変動が原因となり発生すること、圧力角誤差は歯面接触力がかみあいピッチ点付近で過大であるときに塑性変形域が歯の内部にまで拡がり歯末側が塑性的にたわむために発生することを示した。次に歯形誤差の発生原因を排除し、歯形誤差を抑制する加工法として強制変位方式を提案した。この方法は加圧部に剛性の高いねじまたはカムを用いて、工具に転造代に対応する変位を与えて、転造中これを一定に保ち創成運動を行う。実験と解析の結果、この方法では問題となっている歯形誤差の発生を抑制することが可能であり、加工精度と加工速度の点で実用に十分適用できることを示した。

第2章 転造の幾何学と転造過程

仕上げ転造した歯車の歯形誤差は、歯車の歯数、転位係数、工具押込み力などの実験条件によって多様に変化し、歯形誤差の発生原因の究明を困難なものにしている。本研究では初めに歯形形状を客観的に評価するために、転造効果の評価法として歯形曲線の特徴的な変形量から形状変化を表す量を定める。次に歯形誤差を歯車の歯数、転位係数に基づく同時かみあい点数の変化と転造効果の評価量の関係について検討し、次章以降の実験条件を明確に定める。結果を要約する。

(1) 転造効果に客観性を与えるために、転造歯形に現れる特徴的な変形量から、4個の評価量を抽出し実験結果をまとめた。その評価量は最大押込み量 δ_{\max} 、くぼみ δ_{ca} 、歯先付近の押込み量 δ_T 、圧力角誤差 $\delta\alpha$ である。

(2) 転造効果の評価量は、工具をラックとし、被加工歯車の歯数22、工具圧力角 20° の歯車では転位係数によって、次のように変ることを実験と解析によって明らかにした。

転位係数	押込み量（ドリブン側歯面）	フォロワ側歯面）
$x < 0.4$	$\delta_{\max} > \delta_{ca}, \delta_T > 0$	$\delta_{\max} > \delta_{ca}, \delta_T > 0$
$x > 0.4$	$\delta_{\max} \approx \delta_{ca}, \delta_T < 0$	$\delta_{\max} > \delta_{ca}, \delta_T > 0$

第3章 歯車のくぼみ発生機構

仕上げ転造した平歯車のくぼみの発生機構について転造が負荷かみあいであることに着目して、工具が被加工歯車に転造代相当量だけ近寄った場合のかみあい長さの伸びを考慮して解明する。次に、転造中の軸間距離の変化に対応して現れる工具と被加工歯車間の相対角速度の変動が歯形誤差に及ぼす影響を検討する。結果を要約する。

(1) 歯形誤差の発生原因は同時かみあい点数の変化に基づく歯面接触力の変動である。転造歯形の解析にあたり、工具が被加工歯車に転造代相当量近寄ったことにより生ずる作用線上のかみあい長さの伸び、負荷による歯のたわみ、前加工歯形の誤差を考慮して歯形の解析をすれば、歯形上の押込み量を定量的に評価できる。

(2) 工具押込み力一定のもとに転造すると工具と被加工歯車間の角速度が変動する。角速度の変動量は同時にかみあっているドリブン側歯面とフォロワ側歯面の押込み量の差に対応する。換言すれば角速度の変動は転造加工の歯形形成過程において発生する歯形誤差の大きさを表している。

第4章 圧力角誤差の発生機構

仕上げ転造した歯形の圧力角誤差は転造効果の評価量 δ_T で表す。第2章に示したように、転位係数0.4より大きい歯車で δ_T は負となる。このように歯面上の一部で押込み量が負になる問題は、被加工歯車の歯を弾完全塑性体とし、変形は表面にのみ限られるとして、歯面の押込みを主体とした解析的な方法では説明できない。本章では、圧力誤差の発生機構を次のようにして究明する。

転造中の歯形形状の変化は転造1回目に顕著に現れるから、第1に転造1回目における塑性たわみ発生を検証をする。このために転造1回目のかみあい中の歯形の変化と歯の側面に描いた格子点の変位の測定を行う。第2に歯面の押込みを主体とした歯形解析法に歯形中心線の変形の影響を加えて歯形解析をする。結果を要約する。

仕上げ転造した歯車の圧力角誤差は歯末側に発生する塑性たわみと半径方向伸びが原因である。たわみは左右歯面上の接触点の高さが近づき反転する時に塑性変形域が歯の内部にまで拡がり発生する。歯末側のたわみはドリブン側歯面の押込みによる変形を見かけ上減少させ、フォロー側歯面では増加する。歯末側の半径方向伸びは両歯面の押込みによる変形を見かけ上減少させる。

第5章 強制変位方式による仕上げ転造

強制変位方式は高精度の歯形を得ることができる新しい仕上げ転造法である。この方式は定荷重で仕上げ転造する場合に問題となっているくぼみと圧力角誤差の抑制対策として著者が考案したものであり、工具の変位の与え方に基づき強制変位方式と名付ける。

この方法は加圧部に剛性の高いねじまたはカムを用い、加圧要素を操作して工具に強制的に必要な変位を与えた後、工具と被加工歯車の距離を一定位置に保持しながら転造する。加圧部に発生する力は工具押込み力となり、工具と被加工歯車のかみあい部の弾性変形力と釣り合い、被加工歯車の歯面を塑性変形させる。したがって工具押込み力は同時かみあい点数および転造代の多いときには大きく、それらが少ないときには小さくなる。また転造を繰返した場合には塑性変形の進行にともない工具押込み力は減少する。したがって、くぼみの発生を抑制することができるばかりでなく、前加工歯形の改善も可能である。

この章で得た結果を要約する。

(1) 強制変位量と転造効果の評価量の関係を実験により検討し、高精度歯形が得られる加工条件を設定した。

(2) 実験で定めた高精度加工条件について理論解析を行い、強制変位方式の加工精度の限界を明確にした。またその加工条件のもとに、前加工歯形の誤差が改善される特性を解析と実験によって示した。圧力角誤差および凸型のある歯形は転造前の精度が JIS 1 級の以下の場合、転造加工によって 1～2 級改善される。

第6章 生産性を考慮した強制変位方式による仕上げ転造

強制変位方式を実用化するために生産性を考慮した加工条件について、モジュールと歯数の異なる歯車の転造効果の評価法と強制変位量の関係および高速転造における加工精度について検討した。

この章で得た結果を要約する。

(1) 歯車の設計諸元としてモジュール、歯数が与えられた場合の転造条件の設定法として、工具に与える強制変位量と転造効果の評価量の関係を JIS の歯形精度の許容値の条件を考慮して定量化した。

(2) 強制変位方式では実用的な加工速度で転造しても高精度の歯形を得ることができる。設定した実験条件はモジュール 5 の場合には工具駆動速度 7 m/min とし、モジュール 2 の場合には工具駆動速度 3.6 m/min である。そのときの工具押込み力 $F_{1\max}$ と転造効果の評価量 δ_{\max} 、 δ_{ca} の関係および前加工歯形の改善特性は工具速度が低速の場合と変わらない。

第 7 章 結 論

本研究の結果の要約と工業的意義について述べる。

第一に、定荷重方式で転造する場合の歯形誤差の発生機構を明らかにした。

(1) 歯形誤差は実験条件によって多様に変化するので、歯形形状を客観的に評価する方法として転造効果の評価法を定義した。定義した評価法に基づき、歯車の転位係数、工具押込み力などの実験条件と歯形誤差との発生条件の関係を明確にした。

(2) 転造は両歯面負荷かみあいであることに着目して、工具が被加工歯車に転造代相当量の近寄った場合のかみあい長さの伸びを考慮して歯形解析を行い、くぼみ発生機構を定量的に明らかにした。また、転造中の軸間距離の変化に対応して現れる工具と被加工歯車の角速度の変動が歯形のくぼみに及ぼす影響について検討した。

(3) 圧力角誤差は歯末側に発生する塑性たわみと伸びが原因である。これらの変形の検証は転造中の歯形の変形の測定と、歯側面に設定した格子点の変位解析により行った。

第二に、高精度の歯形を得ることができる新しい仕上げ転造法として強制変位方式を提案した。この方式は定荷重方式で問題となっている歯形誤差の実用的な抑制法として、加工精度、加工速度の点で生産現場に十分に適用可能であることを示した。

以上要するに、本論文は現在歯車の生産現場において問題になっている仕上げ転造歯車の歯形誤差の発生原因の究明とその抑制法について論じたものであって、理論と実験の両面からの研究により、初期の目的を達成するまでの過程について記したものである。

審 査 結 果 の 要 旨

仕上げ転造は、被加工歯車の精度と歯面あらさの改善を目的として、わずかな加工代をもった被加工歯車を高精度の工具歯車とかみあわせて、加圧しながら創成運動を行わせる仕上げ加工法であり、量産性に富むが、加工法に固有な歯形誤差が発生し易く、これがこの加工法の普及を妨げていた。本論文は、仕上げ転造に特有な歯形誤差を定量的に測定してその発生機構を解明し、これに基づいて、剛性の高い加工機構を採用して、変位を拘束することにより歯形誤差の発生を抑制する新加工法と加工条件とを提案してその有用性を確認したものであり、全編7章よりなる。

第1章は緒論であり、従来の研究を総括し本論文の目的を述べている。

第2章では、転造による歯形の変化を測定できる巧妙な実験装置を試作して、転造過程を測定し、工具歯車と被加工歯車の歯数、転位係数などの組合せにより、転造の過程が異なることを示し、また、転造条件により、ピッチ点付近でくぼみを生じる歯形誤差のほかに圧力角誤差をも発生することを見いだしている。

第3章では、くぼみの発生が同時かみあい歯数の変化に基づく歯面接触力の変動によることを示し、転造中の弾塑性変形に起因するかみあい長さの伸びを考慮して初めてくぼみを定量的に評価できることを明らかにしている。

第4章では、従来看過されてきた圧力角誤差が、転造条件によっては無視できないことを見だし、圧力角誤差の発生機構を解明している。圧力角誤差は転造中の左右歯面の接触圧力の不均衡に基づく歯の塑性曲げであることをつきとめ、高精度転造のための転造力の設定値を定めている。

第5章では、前章までに明らかにした歯形誤差の発生を抑制するため、剛性の高い転造装置を採用して、これに加工代に対応する変位を強制的に与えて加工する転造法を提案し、この方式により高精度仕上げ転造を実現できることを、実験と理論により明らかにしている。

第6章では、前章の成果に基づき生産性を考慮した変位強制方式の転造装置を試作して、転造実験を行い、高精度転造のための加工条件を定めている。提案した新転造法により、工具歯車を修整することなく、JIS 精度等級で1ないし2級の精度向上が期待できることを述べているが、これは仕上げ転造における優れた成果である。

第7章は結論であり、本論文の成果を要約し、その工業的意義を述べている。

以上要するに本論文は、歯車仕上げ転造法に特有な歯形誤差の発生機構を実験と解析の両面から解明し、誤差の発生を抑制する新加工法を提案し、その有用性を立証したもので、歯車工学ならびに精密工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。